

Biyoyakıt Üretiminde Kullanılan Spinel Yapılı Demir Oksitler

Spinel-Structured Iron Oxides Used in Biofuel Production

Gökhan ÜRESİN¹ , Gülden GÖK¹ 

¹Çevre Mühendisliği, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, TÜRKİYE

Başvuru: 06/12/2023 **Kabul:** 08/12/2023 **Çevrimiçi Basım:** 08/12/2023

Öz

Yenilenebilir enerji ihtiyacı, iklim değişikliği, sınırlı fosil yakıt kaynakları ve enerji güvenliği gibi küresel enerji sorunlarına çözüm bulmak, enerji üretimini daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde yönlendirmek için gereklidir. Bu bağlamda, biyoyakıt üretiminde kullanılan bitkisel yağlar, fosil yakıtlara daha çevre dostu bir alternatif sunan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, bitkisel yağlardan biyoyakıt üretiminde kullanılan yöntemler, hammaddeler ve katalizörlerin avantaj ve dezavantajları ele alınmıştır. Yöntem olarak ise yağların biyoyakıt dönüşümü esnasında ise en yaygın kullanılan transesterifikasyon (Metil Ester Üretimi), hidrojenasyon ve piroliz yöntemleri dikkate alınmıştır. Bu bağlamda literatürde gerçekleştirilen çalışmalar bir tabloda hammadde, katalizör türü, katalizörün üretim yöntemi, yüzey alanı ve yüzde dönüşüm verimi gibi parametreler ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Bu incelemelerde katalizör olarak alüminat ve ferrit bileşikler değerlendirilmiştir. Bu bileşikler arasında iki ve daha çok metalli demir oksitlerin kolay bir şekilde redoks reaksiyon vermesi sayesinde biyoyakıt dönüşüm verimini önemli derecede arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bunun ise yüzey alanı ve üretim yöntemi ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Yüzey alanı arttıkça genel olarak dönüşüm veriminin arttığı ve geniş yüzey alanına ise hidrotermal gibi yöntemle düşük sıcaklıkta kolayca ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Biyoyakıt, Atık yağ, Katalizör, Metal oksit, Spinel yapı

Abstract

The need for renewable energy is necessary to find solutions to global energy problems such as climate change, limited fossil fuel resources and energy security, and to direct energy production in a more sustainable and environmentally friendly way. In this context, vegetable oils used in biofuel production are considered one of the renewable energy sources that offer a more environmentally friendly alternative to fossil fuels. In this study, the advantages and disadvantages of the methods, raw materials and catalysts used in the production of biofuel from vegetable oils are discussed. As a method, the most commonly used transesterification (Methyl Ester Production), hydrogenation and pyrolysis methods were taken into consideration during the conversion of oils to biofuel. In this context, the studies carried out in the literature are summarized in detail in a table, with parameters such as raw material, catalyst type, production method of the catalyst, surface area and percentage conversion efficiency. In these studies, aluminate and ferrite compounds were evaluated as catalysts. It has been concluded that among these compounds, iron oxides with two or more metals significantly increase biofuel conversion efficiency, thanks to the easy redox reaction. It has been understood that this is related to the surface area and production method. It has been concluded that as the surface area increases, the conversion efficiency generally increases and that a large surface area can be easily reached at low temperatures by methods such as hydrothermal.

Key Words

Biofuel, Waste oil, Catalyst, Metal oxide, Spinel structure

*Sorumlu Yazar: Gökhan Üresin



1. Giriş

Enerji, modern toplumların sürdürülebilir gelişimi ve yaşam standardını sağlamak adına temel bir unsurdur. Ekonomik faaliyetler, ulaşım, ısınma, aydınlatma ve endüstri gibi birçok alanda enerjiye olan ihtiyaç, günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir [1]. Ancak, küresel enerji talebi artarken, mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması ve fosil yakıtların tükenmekte olması, enerji sektöründe sürdürülebilirlik sorunlarını gündeme getirmektedir. Fosil yakıtlar, kömür, petrol ve doğalgaz gibi ana enerji kaynakları olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak, bu yakıtların çıkarılması ve kullanılması sadece çevresel sorunlara değil, aynı zamanda enerji kaynaklarının sınırlı olmasından kaynaklanan stratejik zorluklara da neden olmaktadır [2]. Fosil yakıtların tükenmesi, enerji güvenliği açısından büyük bir endişe kaynağıdır ve bu durum, alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirmenin önemini daha da artırmaktadır. [3,4] Gelecekte enerji talebinin karşılanabilmesi ve çevresel etkilerin en aza indirilebilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji politikaları daha fazla önem kazanmaktadır. Bu hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de enerji güvenliğini artırmak için kritik bir adımdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş, rüzgar, su ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerjiyi içerir ve bu kaynaklar, temiz, sınırsız ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir [5,6].

Yenilenebilir enerji kaynakları, günümüzde enerji ihtiyacını karşılamada çevre dostu ve sürdürülebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi çeşitli doğal kaynaklardan elde edilen bu enerji, fosil yakıtlara kıyasla bir dizi avantaja sahiptir [7]. Güneş enerjisi, fotovoltaik hücreler aracılığıyla elektrik üretimine imkan tanırken, rüzgar enerjisi yel değirmenleri veya türbinler vasıtasıyla elektrik enerjisi üretimine katkı sağlar. Hidroelektrik enerji, suyun kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek kullanılırken, jeotermal enerji, yer altındaki termal enerjiyi ısı veya elektrik üretiminde kullanır. Biyokütle enerjisi ise organik materyallerin (ahşap, bitki özleri, atıklar) enerjiye dönüştürülmesini içerir [8]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, çevre üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmeleri ve sınırsız bir kaynak olmalarıyla yakından ilişkilidir. Fosil yakıtların aksine, yenilenebilir enerji kaynakları atmosfere zararlı gazlar salmaz ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynar. Ayrıca, enerji güvenliği açısından da önemli bir stratejik avantaja sahiptirler, çünkü yerel ve sürdürülebilir kaynaklara dayandıkları için enerji bağımlılığını azaltabilirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan sürdürülebilir bir enerji geleceği için kritik bir adımdır [9]. Bu kaynaklar, enerji üretimindeki çeşitliliği artırarak ve karbon emisyonlarını azaltarak temiz bir enerji dönüşümüne öncülük eder.

Bitkisel atık yağlardan sürdürülebilir havacılık yakıtı üretimi, havacılık endüstrisinin çevresel etkilerini azaltma amacıyla yapılan önemli bir girişimdir [10]. Geleneksel havacılık yakıtları genellikle fosil kaynaklıdır ve atmosfere karbon dioksit ve diğer sera gazlarını salarak iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Bu nedenle, bitkisel atık yağlardan elde edilen biyodizel gibi sürdürülebilir havacılık yakıtları, karbon ayak izini azaltarak daha çevre dostu bir alternatif sunar. Bitkisel atık yağlarından sürdürülebilir havacılık yakıtları genellikle transesterifikasyon süreci ile elde edilir. Bu süreç, bitkisel atık yağları metanol veya etanol gibi alkol türleri ile reaksiyona sokarak biyodizel ve gliserol üretimini içerir. Ardından, biyodizel, özel bir rafinasyon sürecinden geçirilerek havacılık standartlarına uygun hale getirilir [11]. Sürdürülebilir havacılık yakıtları, geleneksel jet yakıtlarının teknik özelliklerine uyumlu olup, mevcut uçak motorlarında kullanılabilir şekilde formüle edilir [12]. Bu özellikleri sayesinde, havayolu şirketleri mevcut filolarını modifiye etmeden sürdürülebilir havacılık yakıtlarına geçiş yapabilirler. Ayrıca, bu yakıtların kullanımı, uçaklardan kaynaklanan karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir ve havacılık endüstrisini daha çevre dostu hale getirebilir. Sürdürülebilir havacılık yakıtları, bitkisel atık yağları gibi biyo-yag kaynaklarından elde edildiği için, tarım arazisi kullanımını artırmadan, gıda üretimine müdahale etmeden ve doğal ekosistemlere zarar vermeden üretilebilirler. Bu da bu yakıtları çevresel açıdan daha sürdürülebilir kılar [13]. Bu tür yenilikçi çözümler, havacılık sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır.

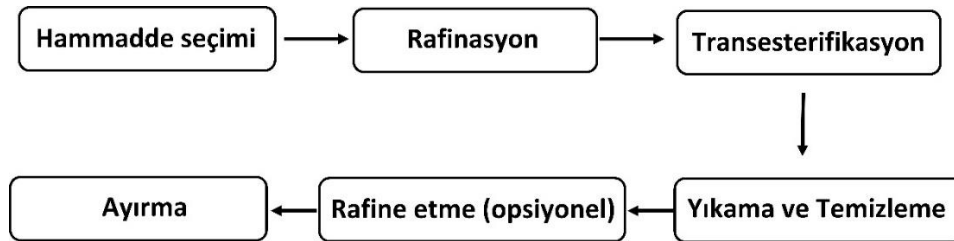
Atık yağlardan jet yakıtı üretimleri metal oksit katalizörleri, transesterifikasyon reaksiyonlarını katalize ederek önemli bir rol oynar ve üretim sürecini iyileştirir. Bu metal oksit katalizörleri genellikle magnezyum oksit, kalsiyum oksit, sodyum oksit, demir oksit ve diğer benzeri maddeleri içerir. Metal oksit katalizörlerinin önemli avantajlarından biri, alkali ve asidik katalizörlere kıyasla daha geniş bir reaksiyon sıcaklığı aralığında etkili olabilmeleridir. Bu, yakıt üretim sürecini daha esnek hale getirir ve farklı koşullarda çalışabilme özelliği sağlar [14]. Ayrıca, metal oksit katalizörleri, transesterifikasyon reaksiyonlarını hızlandırma ve reaksiyonların verimliliğini artırma yetenekleri sayesinde daha hızlı ve etkili bir üretim sürecine olanak tanır. Metal oksit katalizörlerinin kullanımı aynı zamanda reaksiyonun seçiciliğini ve biyodizel ürün kalitesini artırabilir. Bu katalizörler, istenmeyen yan ürünlerin oluşumunu minimize ederek biyodizel kalitesini optimize eder [15]. Bu durum, ürünün çeşitli endüstri standartlarına uygunluğunu ve ticari kullanım için uygunluğunu sağlar. Jet yakıtı üretiminde metal oksit katalizörlerinin kullanımı, sürdürülebilir biyo-yakıt üretim sürecinin daha etkin, verimli ve ekonomik olmasına katkıda bulunabilir. Bu nedenle, bu katalizörlerin seçimi, optimize edilmiş üretim süreçleri ve kaliteli yakıt ürünleri elde etmek için önemlidir. Literatürde bu bağlamda metal oksit katalizörlerine yönelik pek çok deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği fakat bu çalışmaların önemi ve etkisine yönelik bir derlemenin yapılmadığı gözlenmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen bu bilgiler ışığında bitkisel atık yağlardan jet yakıtı ya da biyodizel üretimlerinde kullanılan metal oksit katalizörlerinin önemi ve etkisinin araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle üretim süreçleri daha sonra katalizörlerin etkisi ve ardından metal oksitler ile demir oksitin önemine değinilmiştir.

2. Üretim yöntemleri

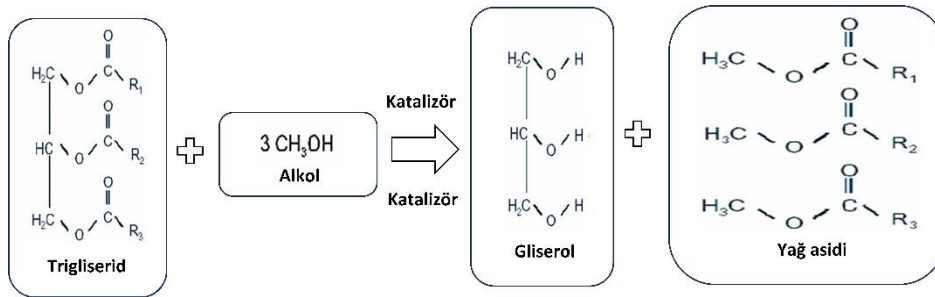
Biyodizel üretiminde kullanılan temel yöntem, genellikle transesterifikasyon olarak adlandırılan bir kimyasal reaksiyondur. Bu süreçte, bitkisel yağlar, hayvansal yağlar veya atık yağlar, metanol veya etanol gibi alkol türleri ile bir katalizör eşliğinde reaksiyona sokulur [16]. Bu reaksiyon sonucunda biyodizel ve gliserol oluşur. Alkali veya asidik katalizörler sıklıkla kullanılır. Alternatif olarak, hidrojenizasyon adı verilen bir başka yöntemde, biyo-yağlar hidrojen ile reaksiyona sokularak biyodizel ve yan ürünler elde edilebilir. Piroliz ise yüksek sıcaklıkta biyo-yağları termal olarak parçalayarak gaz, sıvı ve katı ürünler üretir. Her bir üretim yöntemi, avantajları ve zorluklarıyla birlikte değerlendirilmeli, ham madde seçimi, enerji verimliliği, ürün kalitesi ve ekonomik faktörler göz önüne alınarak seçilmelidir. Transesterifikasyon genellikle daha yaygın olarak kullanılan bir yöntem olsa da diğer yöntemler de belirli koşullar ve gereksinimlere uygun olarak tercih edilebilir [17]. Bu üretim yöntemine yönelik uygulanan süreçler şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca şekil 2’de ise transesterifikasyon sürecinde meydana gelen genel reaksiyon mekanizması verilmiştir. Bu bağlamda hammadde olarak atık bitkisel yağlar yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yağların rafine edilmesi ve ardından transesterifikasyon reaksiyonlarının gerçekleştirilmesi, yıkama ve rafinasyon işlemleri ile sürecin tamamlanması gerçekleştirilir.

Hidrojenizasyon, biyodizel üretimi için alternatif bir yöntem olup, biyo-yağları hidrojen ile reaksiyona sokarak biyodizel ve yan ürünler elde edilen bir süreçtir [18]. Bu yöntemde, genellikle bitkisel yağlar, hayvansal yağlar veya atık yağlar, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hidrojen ile reaksiyona sokulur. Reaksiyon sonucunda, biyodizel ve gliserol dışında, genellikle daha saf bir biyodizel üretimini sağlayan yan ürünler de ortaya çıkar. Hidrojenizasyonun avantajlarından biri, reaksiyon şartlarının kontrolü sayesinde daha yüksek kalitede bir biyodizel üretme potansiyeline sahip olmasıdır. Ancak, enerji yoğun bir süreç olması ve yüksek işletme maliyetleri nedeniyle genellikle transesterifikasyon yöntemi tercih edilir [19,20].

Piroliz, biyo-yağları veya biyokütleyi oksijensiz bir ortamda yüksek sıcaklıkta termal olarak parçalayarak gaz, sıvı ve katı ürünler elde etmeyi amaçlayan bir süreçtir [21]. Bu yöntem, biyodizel üretimi yerine genellikle biyo-kömür veya biyo-yağ gazı gibi diğer yan ürünleri üretmek amacıyla kullanılır. Biyo-yağlar, yüksek sıcaklıklarda termal parçalanma sonucunda biyodizel, biyokömür ve biyo-yağ gazına dönüşebilir. Piroliz, düşük maliyetli ve endüstriyel atıkların bertarafı gibi avantajlar sunsa da ürün çeşitliliği ve enerji yoğunluğu nedeniyle genellikle biyodizel üretimi için tercih edilen bir yöntem değildir [22].



Şekil 1. Transesterifikasyon yöntemi ile biyo yakıt üretim süreci



Şekil 2. Transesterifikasyon reaksiyonları

3. Katalizörler

Katalizör, kimyasal reaksiyonlarda reaksiyon hızını artıran veya reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan ancak kendisi tükenmeyen bir madde olarak tanımlanan bir kimyasal bileşendir. Katalizörler, reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürerek daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleşmelerine olanak tanır. Bu, reaksiyonların daha düşük sıcaklık ve enerji koşullarında oluşmasını sağlar. Katalizörler, başlangıçtaki ve sonraki haller arasındaki enerji farkını azaltarak reaksiyon sürecini optimize ederler. Kimyasal, biyokimyasal ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan katalizörler, bir dizi farklı kimyasal reaksiyonu hızlandırabilir ve

çeşitli ürünlerin üretimini sağlayabilir. Örneğin, biyodizel üretiminde kullanılan katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonlarını hızlandırarak biyodizel ve gliserol elde edilmesini sağlar.

Biyodizel üretiminde kullanılan katalizörler genellikle homojen ve heterojen katalizörler olmak üzere iki ana grupta incelenir. Homojen katalizörler alkali ve asidik olmak üzere pek çok bileşen içerirler. Alkali katalizörler, genellikle sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) gibi bazik maddeleri içerir [23]. Bu katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonunu hızlandırarak biyo-yagların veya hayvansal yağların metanol veya etanol ile esterleşmesini sağlar. Alkali katalizörler, genellikle daha yüksek reaksiyon hızlarına ve biyodizel üretiminde yüksek verimliliğe katkıda bulunur. Asidik katalizörler ise genellikle sülfürik asit (H₂SO₄) veya metansülfonik asit gibi asidik maddeleri içerir. Asidik katalizörlerle gerçekleşen transesterifikasyon reaksiyonu, alkali katalizörlerden farklı olarak daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilir [24]. Asidik katalizörler, özellikle düşük sıcaklık ve ham yağlarda kullanıldığında tercih edilmektedir. Seçilen katalizör türü, üretim sürecinin parametrelerini etkiler. Alkali katalizörler genellikle yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalışırlar, bu da enerji maliyetlerini artırabilir ancak reaksiyon hızını iyileştirebilir. Asidik katalizörler ise genellikle daha düşük sıcaklıklarda çalışabilir, ancak reaksiyon hızları daha yavaş olabilmektedir.

Heterojen katalizörler, kimyasal reaksiyonların hızlandırılması veya başlatılması için kullanılan katalizörlerin bir alt grubunu oluşturur. Bu katalizörler, reaksiyon ortamında farklı bir fazda bulunurlar, genellikle katı halde ve reaksiyona katılan moleküllerle fiziksel olarak etkileşime girerler. Bu katalizörler, yüzeylerinde bulunan aktif siteler aracılığıyla reaksiyonları katalize ederler. Homojen katalizörlerde olduğu gibi asidik ve bazik olan türleri mevcuttur [25]. Asidik olanlar genellikle katı asitlerden türetilmiş malzemeleri içerir ve reaksiyon ortamındaki serbest yağ asitlerini nötralize etme görevini üstlenir [26]. Bu tür katalizörler, ham yağların veya atık yağların içerdiği serbest yağ asitlerinin seviyelerini düşürerek transesterifikasyon reaksiyonlarını iyileştirebilir. Örnek olarak, zeolitler, montmorillonit kil mineralleri ve katı asidik reçineler bu kategoriye örnektir. Diğer taraftan, bazik heterojen katalizörler genellikle metal oksitleri veya alkali metaller içeren malzemeleri içerir. Bu katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonunda etkili bir şekilde trigliseritlerin ve metil veya etil esterlerin oluşumunu katalize eder. Potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum metoksit (NaOMe) gibi alkali katalizörler, genellikle bu grupta yer alır ve yüksek reaksiyon hızları ve verimlilikleri ile bilinirler. Bu bağlamda perovskit yapılı [27,28] ve spinel yapılı metal [29] oksitlerin yaygın bir şekilde tercih edildiği bilinmektedir. Perovskit yapılı metal oksitler, belirli bir kristal yapıya sahip olan ve genellikle ABO₃ formülü ile temsil edilen metal oksit bileşiklerini ifade eder. Bu yapıda, A ve B farklı metal iyonlarını temsil eder. Kristal yapısının istikrarı ve özel özellikleri, perovskit yapılarına sahip malzemeleri özellikle elektronik ve optoelektronik uygulamalarda önemli kılar. Perovskit yapılı malzemeler, güneş enerjisi hücreleri, yarıiletken cihazlar, sensörler ve manyetik malzemeler gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Özellikle perovskit güneş hücreleri, düşük maliyetleri, yüksek dönüştürme verimliliği ve kolay üretilebilirlikleri nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Ancak, perovskit yapılı malzemelerin bazı zorlukları ve kararlılık sorunları da bulunmaktadır. Bu sebeple bir başka alternatif olan spinel yapılı metal oksitler geliştirilmiştir. Spinel yapılı metal oksitler, spinel kristal yapısına sahip olan metal oksit bileşiklerini ifade eder. Spinel yapısı genellikle AB₂O₄ formülüyle temsil edilir, burada A ve B farklı metal iyonlarını, O ise oksijen iyonlarını simgeler. Bu kristal yapısı, bir dizi farklı metal oksit bileşimini içerebilir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, manyetik özellikler, mekanik dayanıklılık ve kimyasal stabilite gibi avantajlar sunarlar [30]. Bu nedenle, spinel yapılı metal oksitler, manyetik malzemeler [31], enerji depolama malzemeleri [32,33] ve katalitik uygulamalar [34,35] gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Bunlar arasında SrAl₂O₄ [36], MgAl₂O₄ [34], MgFe₂O₄ [37], ZnAl₂O₄ [30], CaFe₂O₄ [38] ve SrFe₂O₄ [39] gibi bazı alüminat ve ferrit spineller, manyetik özelliğinden dolayı transesterifikasyon reaksiyonunun sonunda sentezlenen biodizelden katalizatörlerin ayrılmasını kolaylaştırıcı bir rol oynayabileceği için tercih edildiği belirtilmiştir. Bu bağlamda şimdiye kadar transesterifikasyon reaksiyonlarında tercih edilen heterojen yapılı spinel metal oksitlerin kullanımı ve elde edilen verimine yönelik ayrıntılı bilgiler tablo 1'de verilmiştir. Bu bilgilerde ayrıca metal oksitlerin üretim yöntemleri, yüzey alanları ve kullanılan yağ türleri de verilmiştir.

Tablo 1 Biyoyakıt üretiminde tercih edilen heterojen yapılı spinel metal oksitler ve spesifikasyonları

Metal oksitler	Üretim yöntemi	Yüzey alanı	% Dönüşüm	Hammadde	Referans
BaO/Ba _{0,2} Mg _{0,8} Fe ₂ O ₄	Yanma sentez yöntemi	22,3 m ² /g	%97.5	Ayçiçek yağı	[35]
SrAl ₂ O ₄	Islak kimyasal yöntem	89 m ² /g	%90	Kolza yağı	[36]
MgO/MgAl ₂ O ₄	Yanma sentez yöntemi	90 m ² /g	%95.7	Ayçiçek yağı	[34]
ZnAl ₂ O ₄	Hidrotermal yöntem	266.57 m ² /g	%52,22	Soya fasulyesi yağı	[30]
CaFe ₂ O ₄ -Ca ₂ Fe ₂ O ₅ -Fe ₃ O ₄ -Fe	Islak kimyasal yöntem	90 m ² /g kalsinasyon öncesi	%83.5	Soya fasulyesi yağı	[38]
CaFe ₂ O ₄ -Ca ₂ Fe ₂ O ₅ -Fe ₃ O ₄ -Fe	Islak kimyasal yöntem		%78.2	Jatropha yağı	

MoO ₃ /SrFe ₂ O ₄	Islak kimyasal yöntem	-	%95,4	Atık yemeklik yağ	[40]
CuO/MgFe ₂ O ₄	Bilyalı dövme	20 m ² /g	%81	İzoöjenol ve Vanilin Alkol	[37]
CuO/MgAl ₂ O ₄	Bilyalı dövme	3 m ² /g	%64	İzoöjenol ve Vanilin Alkol	
MgO/MgFe ₂ O ₄	Islak kimyasal yöntem	97,8 m ² /g	%91,2	Ayçiçek yağı	[41]
MgFe ₂ O ₄ @CaO	Hidrotermal yöntem	-	%89	Soya fasulyesi yağı	[42]
SO ₄ /Fe-Al-TiO ₂	Islak kimyasal yöntem		%95.4	Atık yemeklik yağ	[39]
NiFe ₂ O ₄	Islak kimyasal yöntem	87,6 m ² /g	%94	Atık yemeklik yağ	[43]
ZnFe ₂ O ₄	Mikrodalga	-	%98,6	Atık yemeklik yağ	[44]
CoZnFe ₂ O ₄	Islak kimyasal yöntem	0.103 cm ³ /g	%99.29	Sentetik yağ	[29]
NiZnFe ₂ O ₄		0.171 cm ³ /g	%93		
CuZnFe ₂ O ₄		0.1372 cm ³ /g	%90.86		

Bu çalışmaların neticesinde spinel yapıları metal oksitlerin katalizör olarak kullanımının bitkisel yağlardan biyoyakıt üretiminde önemli bir avantaja sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu metal oksitler arasında spinel yapıları demir oksitlerin kolay redoks reaksiyona girerek transesterifikasyonlarını hızlandırdığı ve bunun verimi iyileştirmede önem taşıdığı sonucuna varılmıştır. Bir diğer önemli olan husus ise bu tür metal oksitlerin yüzey alanı olduğu gözlenmiştir. Yüzey alanı arttıkça genel olarak dönüşüm verimi de artış göstermektedir. Bunun muhtemel sebebi ise solüsyonun daha fazla metal oksitini yüzeyi ile reaksiyona girme fırsatı bulması ile ilişkilidir. Ancak bazı durumlarda düşük yüzey alanında bile yüksek dönüşüm verimi meydana geldiği gözlenmiştir ki bunun reaksiyona giren metal oksit türü ile alakalı olduğu bilinmektedir. Reaksiyon esnasında solüsyonun metal oksitlerin yüzeyleri ile daha fazla temas edebilmesini engelleyici durumların buna sebep olduğu düşünülmektedir. En yaygın engelleyici ise reaksiyon esnasında metal oksit yüzeylerinde atık reaksiyon ürünü birikmesi ve solüsyonun oksitin iç tabakalarına ulaşamaması olarak bilinmektedir. Sentezlenen metal oksitlerin ise oksidasyon gibi işlemlere tabi tutulacak yöntemler seçilmesi durumunda yüzey alanının azaldığı ve bu sebeple dezavantajlı durum ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Geniş yüzey alanı elde edebilmek için ise hidrotermal gibi bir yöntemin düşük sıcaklıkta ve düşük maliyetle kolay sentez sağlanabilmesi açısından avantajlı olacağı anlaşılmıştır.

4. Sonuçlar

Yenilenebilir enerji talebi, küresel enerji zorluklarına çözüm bulma amacıyla artarken, iklim değişikliği, sınırlı fosil yakıt kaynakları ve enerji güvenliği gibi konular da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, biyoyakıt üretiminde kullanılan bitkisel yağlar, çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkarak fosil yakıtlara alternatif bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, bitkisel yağlardan biyoyakıt üretimi için kullanılan yöntemler, hammaddeler ve katalizörlerin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmalarda bitkisel yağları biyoyakıtlara dönüştürmek için Transesterifikasyon (Metil Ester Üretimi), hidrojenasyon ve piroliz gibi yöntemler ele alınmıştır. Bu bağlamda literatürde yapılan çalışmalar, hammadde, katalizör türü, katalizörün üretim yöntemi, yüzey alanı ve dönüşüm verimi gibi parametrelerin yer aldığı bir tablo ile detaylandırılmıştır. Bu incelemelerde katalizör olarak kullanılan alüminat ve ferrit bileşikleri arasında, özellikle iki ve daha fazla metali demir oksitlerin kolay redoks reaksiyonları gerçekleştirmesi, biyoyakıt dönüşüm verimini belirgin bir şekilde artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun yüzey alanı ve üretim yöntemi ile ilişkilendirildiği gözlemlenmiş; yüzey alanının artması genel olarak dönüşüm verimini artırırken, geniş yüzey alanına hidrotermal gibi düşük sıcaklıkta kolayca ulaşılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Referanslar

- Öymen, G., "YENİLENEBİLİR ENERJİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNDEKİ ROLÜ", *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19 (39): 1069–1087 (2020).
- Ordu, S. and Güllü, İ., "Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmekte olan ülkelerin kalkınma süreçlerindeki rolü", masterThesis, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi*, (2021).
- Ari, F. and Yılmaz, V., "TÜRKİYE'DE VE DÜNYA'DA ENERJİ KAYNAKLARININ GENEL GÖRÜNÜMÜ VE ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARININ ÖNEMİ", *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (34): 496–519 (2023).

4. Erdal, L. and Karakaya, E., "Enerji arz güvenliğini etkileyen ekonomik, siyasî ve coğrafi faktörler", (2012).
5. Kendirli, B. and Çakmak, B., "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sera Isıtmasında Kullanımı", *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 95–103 (2010).
6. Ürün, E. and Soyu, E., "TÜRKİYE' NİN ENERJİ ÜRETİMİNDE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME", *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 31–45 (2016).
7. Güneş, Z., Kirtil, H. E., Küçükata, Y. Ş., and Toprak, B., "Şeker pancarı ve yan ürünlerinden biyoyakıt (etanol) üretimi ve biyoetanolün endüstriyel kullanımının değerlendirilmesi", *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2 (2): 16–24 (2020).
8. Çıtak, M., "Bir Dizel Motorunda Mtbe Katkılı Biyodizel Kullanımının Deneysel Analizi", Master's, Ann Arbor, United States, (2014).
9. Kanli, İ. B. and Kaplan, B., "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Etkin Kullanımı İçin Bir Model Önerisi: Şehir Enerji Kooperatifleri", *Siyaset, Ekonomi Ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 6 (4): 31–42 (2018).
10. Yılmaz, N. and Atmanlı, A., "Havacılıkta Alternatif Yakıt Kullanılmasının İncelenmesi", *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 1 (1): 3–10 (2016).
11. Aybastier, Ö., "Bitkisel Atık Yağların Karakterizasyonu ve Biyodizel Üretiminde Değerlendirilmesi", Master's, Ann Arbor, United States, (2010).
12. Çoban, K., "İnsansız hava araçlarında farklı yakıtlar ile çalışan turbojet motorunun enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri", Ph.D., Ann Arbor, United States, (2018).
13. Zengin, Y., "Yakıt hücresinde hidrojen tüketiminin zamana bağlı değişiminin incelenmesi", masterThesis, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
14. Esen, T., "Heterojen Katalizör Sentezi Ve Çay Atığından Termokimyasal Süreçler İle Hidrojence Zengin Gaz Ürün Eldesi", Master's, Ann Arbor, United States, (2016).
15. Aydın, B., "NANO YAKIT KATKI MADDESİ İLAVE EDİLEN BİYODİZEL DİZEL KARIŞIMININ MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ", Thesis, (2022).
16. Sürer, E., Solmaz, H., Yılmaz, E., Calam, A., and İpci, D., "Dizel-biyodizel karışımına karbon nanotüp katkısının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38 (2): 1055–1064 (2022).
17. Solmaz, H., Sürer, E., Yılmaz, E., Calam, A., and İpci, D., "Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions", *JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE OF GAZI UNIVERSITY*, 38 (2): (2023).
18. Kölgeliler, S., "Biyodizel üretim atığından gliserin eldesi", Master Thesis, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
19. Ünver, H., "Perfloro süstitü Tiyofen ligandlarının Rodyum Ve Paladyum Komplekslerinin Sentezi Ve süperkritik Karbondioksit ortamında bazı Olefinlerin Hidrojenasyon Tepkimelerine Katalitik Etkilerinin İncelenmesi", M.S., Ann Arbor, United States, (2011).
20. Danışman, A., "Bitkisel Yağlardan Değerli Kimyasallar Ve Biyodizel Üretimi", M.S., Ann Arbor, United States, (2008).
21. Özdemir, Z. Ö. and Mutlubaş, H., "BİYODİZEL ÜRETİM YÖNTEMLERİ ve ÇEVRESEL ETKİLERİ", *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2): 129–143 (2016).
22. Eraslan, Ü., "FARKLI TÜRDEN ATIKLARIN PİROLİZİ SONUCU ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN YANMA VERİMİNİN VE EMİSYON DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ", Thesis, (2021).

23. Gülüm, M., Bilgin, A., and Çakmak, A., "SODYUM HİDROKSİT (NaOH) VE POTASYUM HİDROKSİT (KOH) KULLANILARAK ÜRETİLEN MISIR YAĞI BİYODİZELLERİNİN OPTİMUM REAKSİYON PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (3): 503–511 (2015).
24. Dönmez, G., "Maya ve fungus lipitlerinin soxhlet sistemi ile ekstraksiyonu", (2011).
25. Akgül, G., Sözer, S., and Culfa, M., "ATIK YAĞLARDAN BİYODİZEL ÜRETİMİNDE YENİLİKÇİ BİYOKÖMÜR KATALİZÖRÜ", *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10 (4): 29–39 (2017).
26. Özdemir, Z. Ö. and Mutlubaş, H., "Heterojen Katalizör Tasarımli Biyodizel Üretimi", *Journal Of The Institute Of Science And Technology*, 9 (4): 2157–2165 (2019).
27. Akinay, Y. and Hayat, F., "Synthesis and microwave absorption enhancement of BaTiO₃ nanoparticle/polyvinylbutyral composites", *Journal Of Composite Materials*, 53 (5): 593–601 (2019).
28. Bhalla, A. S., Guo, R., and Roy, R., "The perovskite structure—a review of its role in ceramic science and technology", *Materials Research Innovations*, 4 (1): 3–26 (2000).
29. Farokhi, G. and Saidi, M., "Catalytic activity of bimetallic spinel magnetic catalysts (NiZnFe₂O₄, CoZnFe₂O₄ and CuZnFe₂O₄) in biodiesel production process from neem oil: Process evaluation and optimization", *Chemical Engineering And Processing - Process Intensification*, 181: 109170 (2022).
30. Quirino, M. R., Oliveira, M. J. C., Keyson, D., Lucena, G. L., Oliveira, J. B. L., and Gama, L., "Synthesis of zinc aluminate with high surface area by microwave hydrothermal method applied in the transesterification of soybean oil (biodiesel)", *Materials Research Bulletin*, 74: 124–128 (2016).
31. Cao, Y., Mohamed, A. M., Mousavi, M., and Akinay, Y., "Poly(pyrrole-co-styrene sulfonate)-encapsulated MWCNT/Fe–Ni alloy/NiFe₂O₄ nanocomposites for microwave absorption", *Materials Chemistry And Physics*, 259: 124169 (2021).
32. Polat, S., "Production of ZnFe₂O₄ Doped Carbon Cloth-Based Flexible Composite Electrodes for Supercapacitors", *Türk Doğa Ve Fen Dergisi*, 10 (2): 199–205 (2021).
33. Mashrah, M. and Polat, S., "Hydrothermal synthesis and electrochemical performance of GNPs-doped MgFe₂O₄ electrodes for supercapacitors", *Solid State Ionics*, 391: 116107 (2023).
34. Rahmani Vahid, B., Haghighi, M., Alaei, S., and Toghiani, J., "Reusability enhancement of combustion synthesized MgO/MgAl₂O₄ nanocatalyst in biodiesel production by glow discharge plasma treatment", *Energy Conversion And Management*, 143: 23–32 (2017).
35. Rahmanivahid, B., Ajamein, H., Zakizadeh, T., and Nayebzadeh, H., "Fabrication of super basic Ba_xMg_(1-x)Fe₂O₄ magnetic spinel nanocatalyst toward biodiesel production", *Materials Research Bulletin*, 165: 112321 (2023).
36. Mierczynski, P., Chalupka, K. A., Maniukiewicz, W., Kubicki, J., Szykowska, M. I., and Maniecki, T. P., "SrAl₂O₄ spinel phase as active phase of transesterification of rapeseed oil", *Applied Catalysis B: Environmental*, 164: 176–183 (2015).
37. Rahmanivahid, B., Pinilla-de Dios, M., Haghighi, M., and Luque, R., "Mechanochemical Synthesis of CuO/MgAl₂O₄ and MgFe₂O₄ Spinel for Vanillin Production from Isoeugenol and Vanillyl Alcohol", *Molecules*, 24 (14): 2597 (2019).
38. Xue, B., Luo, J., Zhang, F., and Fang, Z., "Biodiesel production from soybean and Jatropha oils by magnetic CaFe₂O₄–Ca₂Fe₂O₅-based catalyst", *Energy*, 68: 584–591 (2014).
39. Arrais Gonçalves, M., Karine Lourenço Mares, E., Roberto Zamian, J., Narciso da Rocha Filho, G., and Rafael Vieira da Conceição, L., "Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using magnetic acid heterogeneous catalyst MoO₃/SrFe₂O₄", *Fuel*, 304: 121463 (2021).
40. Arrais Gonçalves, M., Karine Lourenço Mares, E., Roberto Zamian, J., Narciso da Rocha Filho, G., and Rafael Vieira da Conceição, L., "Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using magnetic acid heterogeneous catalyst MoO₃/SrFe₂O₄", *Fuel*, 304: 121463 (2021).

41. Alaei, S., Haghighi, M., Toghiani, J., and Rahmani Vahid, B., "Magnetic and reusable MgO/MgFe₂O₄ nanocatalyst for biodiesel production from sunflower oil: Influence of fuel ratio in combustion synthesis on catalytic properties and performance", *Industrial Crops And Products*, 117: 322–332 (2018).
42. Liu, Y., Zhang, P., Fan, M., and Jiang, P., "Biodiesel production from soybean oil catalyzed by magnetic nanoparticle MgFe₂O₄@CaO", *Fuel*, 164: 314–321 (2016).
43. Gardy, J., Osatiashtiani, A., Céspedes, O., Hassanpour, A., Lai, X., Lee, A. F., Wilson, K., and Rehan, M., "A magnetically separable SO₄/Fe-Al-TiO₂ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil", *Applied Catalysis B: Environmental*, 234: 268–278 (2018).
44. Ashok, A. and Kennedy, L. J., "Magnetically Separable Zinc Ferrite Nanocatalyst for an Effective Biodiesel Production from Waste Cooking Oil", *Catalysis Letters*, 149 (12): 3525–3542 (2019).